

Együttes joint inverziós módszerek fejlesztése felszínközeli 2D és 3D szerkezetek kutatására  
(szakmai beszámoló, OTKA 37842)

A kutatási téma keretében a Geofizikai Tanszéken kifejlesztett illetve fejlesztés alatt álló a sorfejtéses technikán alapuló együttes inverziós módszerek továbbfejlesztése volt a kitűzött cél. Ennek keretében számos kérdés tisztázására, valamint új módszerek kifejlesztésére került sor. Ezek között új direkt feladat megoldások, a bázisfüggvények típusának és a függénysorok hosszának meghatározása, további módszerkombinációk kipróbálása, eltérő réteghatárok kezelése, a sorfejtéses technika „nem konvencionális” inverziós alkalmazása a GRM és IP módszerek területén, a leképezési pontosság javítása és a 3D-ra való kiterjesztés vizsgálata szerepelt. Az alkalmazott kutatási módszerek között irodalomkutatás, együttes inverziós algoritmusfejlesztés, programfejlesztés, algoritmusok működésének ellenőrzése szintetikus adatrendszerrel a terepi viszonyokat szimuláló különböző modell- és mérési zajterhelésekkel, terepi mérési adatokon való alkalmazás, kipróbálás szerepelt.

Valamennyi inverz feladat központi részét képező **direkt feladatok** megoldása illetve e megoldások vizsgálata a sorfejtéses inverziós technika szemszögéből:

- E területen jelentős előrelépést értünk el azzal, hogy az egyenáramú 1D direkt feladat megoldást (1.5D függvényinverziós módszer) felváltottuk egy 3D (véges differenciás) direkt feladat megoldással egy- és ugyanazon az inverziós algoritmuson belül. A 3D direkt feladat megoldás beépítése nemzetközi együttműködés eredménye (TU Freiberg, Németország). Az eljárást *kombinált függvény inverziós* módszernek neveztük el.
- Az elektromágneses módszerek inverziós algoritmusokba való bevonásának algoritmus szintű lehetősége adott, azonban több dimenziós esetben a direkt feladat megoldása jelentős gépidőt igényel mesterséges források alkalmazásakor. A síkhullámú gerjesztő tér esetétől eltekintve a felszín közeli struktúrák kutatásakor az átmeneti zónába esik a mérések zöme. A felszín közeli struktúrákra vonatkozó érzékenységi vizsgálatok mellett tér- és frekvenciatartománybeli leképezésekre helyeztük a hangsúlyt.
- A refrakciós direkt feladatok megoldása keretében a SH refraktált hullámok direkt feladatát (ray-tracing) is leszármaztattuk a P hullám megoldásból és az együttes inverziós algoritmusba illesztettük.

Arra a sorfejtéses technikát alkalmazó inverziós módszereknél folyamatosan felmerülő kérdésre kerestünk választ, hogy hogyan válasszuk meg a **bázisfüggvények típusát**, valamint arra, hogy a függvénysorokban **hány elemet** használjunk a fizikai illetőleg geometriai paraméterek leírására.

- Az inverziós algoritmusainkat továbbfejlesztettük úgy, hogy egyazon inverziós algoritmusba több **különböző bázisfüggvény** szerint sorba fejtett függvényt (hatványfüggvény és Fourier-sor) lehet alkalmazni. Tapasztalataink szerint a „nyugodtabb” lefutású - laterálisan kisebb térfrekvenciával változó – modellparaméterek esetén a kisebb elemszámú hatványsorok, míg a változékonyabb modellparaméterek esetében az ortogonális trigonometrikus – Fourier sorok – alkalmazása célszerű. Ez utóbbiak kedvező tulajdonságai miatt hosszú függvénysorok is alkalmazhatók, amellyel akár a réteghatárokon beálló „hirtelen” változások is jól közelíthetők. A függvénysorok hosszának azonban egyéb okok határt szabhatnak. Ilyenek a refraktált hullámok gyakorlatban tapasztalt sávkorlátozottsága miatti Fresnel-zóna mérete okozta korlátozott felbontás, valamint a geoelektromos véges differenciás direkt feladat alkalmazása esetén a számítási idő jelentős hossza. Amennyiben modellparaméterek értékeinek nagy a „dinamikája” a modellparaméterek logaritmusának sorba fejtésére is van lehetőség az inverzió stabilitásának érdekében. (Ilyen logaritmikus függvények használatakor azonban az együttes inverzió csak korlátozottan valósítható meg)
- A szeizmikus modellparamétereket közelítő **függvénysorok elemszámának meghatározására** általánosan használható összefüggést megtalálni eddig nem sikerült. A különböző szintetikus, modellszeizmikus és terepi mérési adatok feldolgozásakor szerzett tapasztalatok alapján elmondható, hogy túlságosan hosszú hatványsorok alkalmazása gyakran vezet instabil, megbízhatatlan becslésekhez, szemben bevált Fourier sorokkal. Jelenleg az iteratív inverz feladat többszöri egymás utáni megoldását követően – függvénysorok elemszámainak változtatása mellett – a legpontosabban és legmegbízhatóbban becsült modellhez tartozó elemszámot fogadjuk el. Kétségtelen, hogy mindez az algoritmussal és a kutató felzínközeli struktúrákkal kapcsolatban tapasztalatokat feltételez. Mivel azonban az alkalmazott direkt feladat megoldás gyors, így a számítás sorozat sok időt nem igényel a felhasználótól.

Az **együttes inverziós módszerkombinációt** továbbfejlesztettük úgy, hogy az egyenáramú geoelektromos VESZ, dipole-dipole és pole-pole 1.5D, valamint a longitudinális refraktált 2D módszerekhez hozzávettük az **SH refraktált 2D módszert** is. A horizontálisan poláros transzverzális refraktált (SH) hullámok direkt feladat megoldó algoritmusát a már kipróbált P hullám közelítő ray-tracing módszerre alapozva készítettük. Ez a szeizmikus (rugalmas) paraméterek meghatározásának lehetősége terén jelent előrelépést. Az

algoritmusra elkészült egy Fortran nyelvű program, amelyet szintetikus adatokon történt ellenőrzés alapján jól működik. A terepi adatokon való **paralel inverziós** vizsgálatok is megtörténtek, amelyek eredményeként a teszt területünkön longitudinális hullámokkal a talajvíz szint felszínét, míg a transzverzális hullámokkal a mélyebben fekvő közethatárt sikerült kimutatni. Sikerült bebizonyítani, hogy mindkét sebességre szükség van a féltér pontos leírására. A sebességekből a felszínközeli geológiai szerkezetek rugalmas állandóit is sikerült meghatározni. Az együttes inverziós eredmények publikálása a közeljövőben várható.

A sorfejtéses technikát az eddigi „klasszikusan” alkalmazott inverziós módszereken kívül **más inverz feladatok megoldásában** is felhasználhatjuk. E kutatómunka keretében két ilyen területen is születtek eredmények.

- A refrakciós idő adatok kiértékelésére széleskörűen alkalmazott és kedvelt **GRM „közvetlen inverziós”** eljárás egyik nagy pontatlanságot okozó hiányosságának - az „XY” kilépési távolságok szelvény menti változatlansága – feloldására történtek fejlesztések. Ennek eredményeként a kilépési távolságokat a szelvény menti távolság folytonos függvényeként értelmezzük, és ezt a változást sorbafejtett függvényekkel közelítjük. Ezzel a GRM közvetlen inverzió, néhány lépéses iteratív inverz módszerre alakult. A kifejlesztett eljárás algoritmusára programot írtunk (MatLab). Ezen kívül a lokális rétegdőlések hatásának korrigálásával, és a refrakciós mélység migráció alkalmazásával kapcsolatban is történtek sikeres fejlesztések. A kifejlesztett módszer teljesítőképességét szintetikus és analóg szeizmikus modell adatokon vizsgáltuk - eredménnyel. *(Megemlítem, hogy ezen téma a projekten alkalmazott egyik PhD hallgató kutatási témája, aki abszolutóriumát megszerezte, és jelenleg dolgozatát írja.)*
- Az **indukált polarizáció (IP)** a környezeti foltok, főként a hulladéklerakók kimutatásának és jellemzésének az egyik igen hatékony geofizikai módszere. A mérési adatok feldolgozásának egyik fontos módszere TAU-transzformáció, amely a ME Geofizikai Tanszéken került kifejlesztésre. Amennyiben az időállandó spektrumot folytonos függvénnyel közelíthetjük a TAU-transzformációt általánosíthatjuk azáltal, hogy a spektrumot sorbafejtett függvényekkel közelítjük, és a mért polarizációs adatokból a sorfejtési együtthatókat inverziós technikával becsüljük. Ezen új módszer megvalósítására algoritmust és számítógépi programot fejlesztettünk. (másik OTKA kutatási témával közösen). A kifejlesztett program a Chebishev és intervallumonként

konstans bázisfüggvények szerint sorfejtést alkalmazza. A módszert terepi mérési adatokon sikerrel kipróbáltuk.

Az eltérő réteghatárokat „kezelni” képes együttes inverziók a felszínközeli struktúrák kutatásában nagyon fontos szerepet játszhatnak. E területen az együttes inverzió **egy új módszerének** algoritmizálása és programozása történt meg.

- Ebben az esetben az együttes inverzió megvalósíthatóságának alapfeltétele az, hogy a különböző az inverzióban „részt vevő” geofizikai módszerek modelljeiben legyen közös paraméter, azaz közös ismeretlen, amely jellemzően a rétegvastagságok, illetve az azokat jellemző sorfejtési együtthatók. Korábbi vizsgálataink bebizonyították, hogy együttes inverzió eltérő réteghatárokkal úgy is megvalósítható, hogy a különböző geofizikai módszerek modelljeinek réteghatárai nem egyeznek meg. Ez úgy érhető el, hogy a réteghatárokat leíró azonos bázisfüggvény szerinti függvénysorokat különböző hosszúságúra választjuk, azaz az ismeretlenek között nem mindegyik megegyező.
- E kutatás keretében kifejlesztett eljárás ezzel szemben nem a sorfejtési együtthatók megegyezésére alapozza az együttes inverzió megvalósítását, hanem **a modellparaméterek terében ír elő összefüggéseket** a réteghatárok között, például rétegvastagságok közti összefüggés, rétegvastagságok egyezősége, párhuzamos eltolás, stb. formájában:

$$h_1^{(SH)}(x) = h_1^{(P)}(x) + h_2^{(P)}(x) \quad h_1^{(seis)}(x) = h_1^{(ele)}(x) \quad h_1^{(seis)}(x) = h_1^{(ele)}(x) + const$$

- Ezen összefüggéseket a sorfejtési együtthatók terében diszkrét x távolságokra (például VESZ pontokon, vagy hullámforrások pontjain) egyenletek formájában írjuk fel, amelyeket mint **regularizációs egyenlőségeket** az inverz probléma megoldásának normálegyenletének kiszámítása során vesszünk figyelembe. Ezzel az inverz feladat megoldandó normál egyenlete az alábbi alakot ölti:

$$\Delta \vec{c} = \left( (\underline{G} + \underline{Q})^T * \underline{W} * (\underline{G} + \underline{Q}) + \lambda \underline{I} \right)^{-1} * (\underline{G} + \underline{Q})^T \Delta \vec{y}$$

ahol  $\Delta \vec{c}$  az ismeretlen együtthatók korrekciós vektora,  $\Delta \vec{y}$  az adattérbeli eltérések vektora,  $\underline{G}$  a derivált mátrix és  $\underline{Q}$  a regularizációs egyenletek együttható mátrixa. A  $\lambda$  és  $\underline{I}$  a csillapítást szolgálják. Ezáltal lehetőség nyílik arra, hogy különböző bázisfüggvények szerinti sorfejtés alkalmazásával is megvalósítható legyen az eltérő réteghatárokat lehetővé tevő együttes inverzió.

- A regularizációs egyenleteket **súlyozottan vesszük figyelembe** ( $W$  mátrix). Ezzel a geofizikai módszerek egymásra hatásának „erősségét”, azaz az együttes inverzió hatásfokát szabályozhatjuk. Kis súlyokat alkalmazva a módszerek egymásra hatása kicsi lesz, gyakorlatilag két egymástól független szóló inverziót hajtunk végre egy inverziós számítási procedúrában. Nagy súlyok alkalmazásával az együttes inverziós algoritmus „szigorúan” veszi figyelembe az előírt kapcsolatot, és így a valódi együttes inverziót valósítjuk meg.
- A módszer és algoritmus lehetőséget teremt arra a speciális eset együttes inverzióként való megvalósítására is, amikor **apriori tapasztalati összefüggések** állnak rendelkezésünkre a modellek fizikai paramétereinek között is (pl. fajlagos ellenállás és sebesség), vagy például fúrásokból származó közvetlen információk is rendelkezésre állnak.

A felszínközeli geológiai struktúrák **leképezési megbízhatóságának és pontosságának növelésének** egyik legfontosabb fejlesztési területe az inverzióban alkalmazott direkt feladatok kiterjesztése a két- illetve háromdimenziós megoldására.

- A jelen kutatási témán belül e területen olyan fejlesztési eredmények születtek, amelyek abban specifikusak, hogy a modellparamétereket sorbafektett függvényekkel adjuk meg, vagy más kifejezéssel élve parametrizáljuk. Ezzel kettős előnyt lehet elérni a „klasszikus” két- illetve háromdimenziós parametrizálással szemben: egyrészt a „réteghatárt”, mint geológiai információt is bevisszük a rendszerbe, másrészt a meghatározandó (becsülendő) ismeretlenek számát drasztikusan csökkentjük. Mindkettő a megbízhatóság és pontosság növelésének irányába hat.
- A geoelektromos adatok együttes (szimultán) 1.5D inverzióját továbbfejlesztettük egy véges differenciás 3D direkt feladat alkalmazásával az 1D helyett végső soron „valódi” 2D/3D inverziós módszerré. A számítási idővel való takarékoskodás érdekében az (iteratív) inverz feladatot először egydimenziós direkt feladat alkalmazásával több iteráción keresztül oldjuk meg, majd a megoldás közelében két- illetve háromdimenziós direkt feladatot alkalmazva néhány iterációval jutunk el a végső megoldáshoz. A direkt feladat megoldásának módjától függetlenül az ismeretlenek változatlanok. A 2D/3D módszer alkalmazása esetén a modellt

iterációnként és mérésenként újra kell diszkretizálni. Az eljárást kombinált függvényinverzióknak nevezzük, amely a várt pontosabb eredményeket produkálta a gyakorlatban is.

A **3D problémák megoldásának** vizsgálatára kezdeti lépéseket tettünk. Meggyőződésünk, hogy megbízható becslést felszínközeli geológiai szerkezetekre csak a 3D inverz feladat megoldásával lehet adni. A ME Geofizikai Tanszékén folyó fejlesztések a sorfejtéses inverziós technika terén reményt nyújtanak arra, hogy az általában igen nagy méretű 3D inverz feladatokat még elfogadható egyszerűsítések felhasználásával megbízhatóan és viszonylag gyorsan meg lehessen oldani.

- Ennek keretében a már említett kombinált inverzióval szintetikus adatok segítségével sikerült olyan modell paramétereit megbecsülni, amely 2D modellben az egyik „rétegnek” a harmadik dimenzió irányában is volt kiterjedése. Ez az eredmény ebben az irányban való továbbkutatásra ösztönöz.
- A felületi hullámok diszperziós adatainak frekvenciánkénti 2D tomográfiai feldolgozásával, majd azok lokálisan egydimenziós inverzióinak sorozatával, amelyet egy a réteghatárt közelítő kétváltozós sorbafejtett függvény kapcsol össze egy közelítő 3D szimultán inverzióvá, egy háromdimenziós rétegezett modell paramétereit becsülhetők. Ezt a módszert egy másik OTKA kutatási téma keretében fejlesztették ki, amelyre algoritmus és program készült.
- A tomográfiai eljárások sajátágaiból adódóan azonban a kutatási területek szélein bizonytalanok a sorfejtési együtthatók becslései, és ezáltal a modellparaméterek is pontatlanok, megbízhatatlanok. E probléma kiküszöbölésére a közelítő 3D inverz feladatot együttes inverzióvá fejlesztettük, amely során a kutatási terület szélein telepített refrakciós mérések adatait „lokálisan” 2D direkt feladat megoldásával integráltuk az inverzióba. Mind a felületi hullám módszerhez, mind a refrakciós módszerhez ugyanazon sorfejtési együtthatók tartoztak. A módszer helyes működéséről szintetikus adatokon való ellenőrző számításokkal győződünk meg.

A T037842 számú OTKA kutatás 4 éves futamideje alatt az együttes inverzió számos részlet- és stratégiai kérdéseivel foglalkoztunk. Az elért eredményeket – amint olyan stádiumba kerültek azonnal – konferenciákon (EAGE, EEGS, EGU) a nemzetközi szakmai

közösség elé tártuk. Ezen konferenciák többségében a kinyomtatott (illetve CD-n közreadott) négyoldalas absztraktok rövid publikációnak számítanak. Ennek ellenére az ott elhangzott reflexiókat is figyelembe véve további folyóirat cikkek is készültek, készülnek. E kutatás lezárásától függetlenül e kutatási témára való hivatkozásokat természetesen szerepeltetni fogjuk.

A konferenciákon számos „nyilvános” és szűkebb körű megbeszélést, vitát folytattunk/folytatunk az általunk képviselt sorfejtéses, valamint együttes inverziós módszer különböző kérdéseiről. Ezek során azt tapasztaltuk, hogy vitapartnereink a nemzetközi kutatási gyakorlatban általánosan elfogadott módszerekhez képest újszerű irányvonalnak tartják. A kezdeti tartózkodás ellenére azonban már követőkre is találtunk. Valószínűleg erre a folyamatra vezethető vissza az ilyen témájú publikációink lassabb „átfutása”, valamint a reagálások, hivatkozások késéssel való megjelenése. (Példaként erre két korábbi dolgozatunkat említem, DOBRÓKA, M., GYULAI, Á., ORMOS, T., CSÓKÁS, J., DRESEN, L. 1991. *Joint inversion of seismic and geoelectric data recorded in an underground coal mine. Geophysical Prospecting* 39. pp. 643-655. és GYULAI, Á., ORMOS, T. 1999. *A new procedure for the interpretation of VES data: 1.5-D simultaneous inversion method. Journal of Applied Geophysics*. 41. 1-17. amelyekre napjainkban - 14, illetve 6 év múltán - jelennek meg növekvő számban független hivatkozások)

A megkezdett munkát és az eddigi eredményeket - elsősorban a 3D leképzést és alkalmazást tekintve - más OTKA témák keretében fel tudjuk használni, illetőleg részben folytatni fogjuk. Hasonló vonatkozik e kutatás keretében beruházott jelentős eszközre is: a terepi szeizmikus műszerünk vezérlő-adatgyűjtő „rugged” PC-jére.

Végezetül a kutató társaim és a doktorandusz hallgatók nevében is köszönetet mondok a szíves támogatásért.